

水动力条件下底泥中氮磷释放通量*

李一平¹ 逢勇¹ 吕俊² 张刚¹
丁玲¹ 彭进平¹ 王超¹ 范丽丽¹

(1:河海大学环境科学与工程学院,南京 210098;2:广西省水文水资源局,南宁 530023)

提 要 在环形水槽内模拟了水动力条件下底泥的起动规律,分析了底泥运动的不同状态。该环形水槽内水体流速基本均匀,水槽转速与槽内水体流速能够精确的相互转换,实验中通过改变水槽转速模拟了不同扰动强度下底泥悬浮和释放的规律。以太湖底泥为例,通过上覆水中 TN、TP 浓度的变化,建立了底泥中 TN、TP 的释放通量(y)与水流(x)的关系,其表达式为 TN: $y = 137.88e^{0.06x}$, ($R^2 = 0.94$); TP: $y = 36.78e^{0.56x}$ ($R^2 = 0.97$); 并将该实验结果应用在太湖的水量水质模型中,取得了比较满意的效果。

关键词 底泥释放 水动力 环形水槽 数学模型 太湖

分类号 P343.3

在湖泊富营养化治理方面,内源释放一直是比较关注的问题,也是治理的难点。而为了减少内源负荷,就必须对湖泊水体和沉积物之间的物质交换和输送的规律有明确的了解。对于太湖这样的大型浅水湖泊,水动力对于底泥的悬浮和营养盐释放起着非常大的作用^[1]。目前,对太湖沉积物中营养盐的赋存形态与含量的研究以及不同环境条件下沉积物中营养盐静态释放研究的文章比较多见^[2-7],分析了营养盐在底泥中的迁移转化特性,不同环境因子(溶解氧、水温、pH等)对底泥营养盐释放的影响,以及底泥间隙水中营养盐的分布特性和释放机理等,取得了很多有意义的成果,但大都限于底泥的静态释放;也有一些文章具体分析了水动力因素对底泥释放的影响^[5,6],但都仅限于使用烧杯、锥形瓶等模拟湖体,不能很好的代表太湖湖体的实际情况,并且在利用人工搅拌或机械搅拌模拟太湖水动力因素时,很多文章都没有建立搅拌速度与装置内水体实际流速之间的关系,只能定性的说明动力扰动造成的沉积物营养盐释放远较静态条件为大^[8,9],在特定条件下有的表现为源的释放,有的表现为汇的吸附等;秦伯强^[10]的最近研究成果表明太湖水土界面处物质交换主要发生在沉积物表层5-10cm范围内,计算出了导致底泥悬浮的临界切应力和临界风速,估算了太湖一次大的动力过程可能造成的内源释放的最大数量,并提出了有关大型浅水湖泊内源释放的概念性模式,取得了重要的成果。但底泥释放通量与水动力条件关系的研究还未有人做,也是研究的难点。本文是这方面的一个尝试,试图以太湖为例建立底泥中总氮(TN),总磷(TP)的释放通量与水体流速大小之间的关系,将底泥释放率参数化,在此基础上为太湖的水

* 国家自然科学基金(50239030)、国家“863”“十五”重大科技专项(2003AA6011002)、江苏省自然科学基金(BK2002067)联合资助。2003-11-15收稿;2004-02-20收修改稿。李一平,男,1978年生,博士研究生, E-mail: Liyiping2000@sina.com.

量水质以及富营养化数学模型提供参数支持。

1 材料与方 法

1.1 试验装置及工作原理

1.1.1 环形水槽简介 本次实验在河海大学海岸及海洋工程研究所双向环形水槽中进行,其装置见图 1,它是由上盘、下盘和计算机控制系统组成。下盘底板上安装两个直径分别为 108cm 和 150cm 有机玻璃同心圆环,成为水槽的内壁和外壁,两壁之间宽(即水槽宽)为 21cm,壁高 41cm,并且在外壁不同高度处都设有取样口;上盘为一环片,覆盖在环槽上,上盘的高度可以调节,以控制水深。

1.1.2 环形水槽工作原理 环形水槽是把直槽的长度转化为时间尺度,以模拟无限长的水槽,解决了直槽研究泥沙中水泵搅动破坏絮团及细颗粒泥沙沉降速度慢,直槽不够长等问题。另外,由于水槽体积小,实验所需泥沙量少,所以可以精确模拟现场环境的不同流速、不同含沙量等条件,可以对泥沙起动流速、动水沉速、冲刷率等进行实验研究,通过水槽实测数据计算淤积量,冲刷深度等。本实验中,水槽的上下盘由计算机自动控制无级调速电机带动而产生相向运动,在切应力作用下产生水流。由于水槽存在曲率,则下盘运动会使水流产生沿半径向外的离心力,出现向外的横向副流;而上盘向相反方向转动时,会使水流产生沿半径向里的离心力,出现向里的横向副流。又因为离心力的大小与转盘的流速大小有关,故通过对上下盘转速比的合理调配,可使离心力相互抵消,使副流基本消失,槽内流场基本均匀,这样整个水槽就相当于一个宽阔的水体。由于太湖实际流速在小范围内变化不大,特别是湖底流速在小范围内可近似看为均匀,故环形水槽能够模拟无限长的水槽,并且槽内流场基本均匀的特征为粗略模拟太湖湖体的实际水流状况提供了可能,本文正是基于这一点利用该装置探讨了水动力条件下太湖底泥释放的规律和特征。

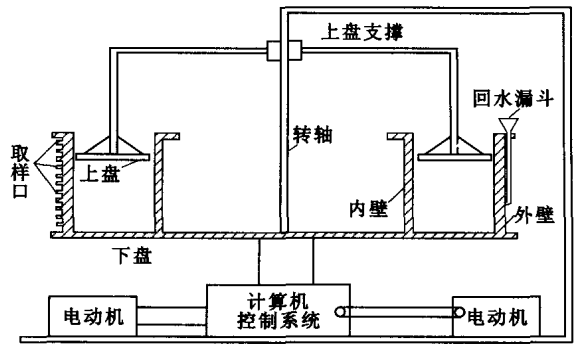


图 1 环形水槽结构示意图

Fig. 1 Structural representation of annular tank

由于太湖实际流速在小范围内变化不大,特别是湖底流速在小范围内可近似看为均匀,故环形水槽能够模拟无限长的水槽,并且槽内流场基本均匀的特征为粗略模拟太湖湖体的实际水流状况提供了可能,本文正是基于这一点利用该装置探讨了水动力条件下太湖底泥释放的规律和特征。

1.2 实验方法

本研究于 2003 年 4 月 26 日 - 4 月 30 日在河海大学海岸及海洋工程研究所重点实验室进行。实验期间气温控制在 25℃,实验分二个阶段连续进行,第一阶段为前期准备阶段,将采集回来的太湖沉积物均匀铺于环形水桶底部,轻压使底泥处于相对平整状态,并控制底泥厚度为 5cm,再以虹吸法轻注入采集的新鲜湖水,水深为 15cm,然后静置 24h。第二阶段为研究阶段,通过微机控制使水体流速分别为 0, 5, 8.5, 17.5, 25, 30, 40, 50, 60cm/s 进行实验研究。实验从零流速(即静置)开始,逐步加速,每一流速均保持水流作用 30min,然后分上、中、下三层采集样品,并及时进行分析实验,之后进入下一流速,如此直到试验研究的最高流速。

1.3 样品采集与分析

1.3.1 水样 用有机玻璃采样器采集样点(125°25'50"N, 20°12'04"E)沉积物上覆水约 150L,

装入清洁的蒸馏水瓶中并使不留气泡,即日带回备用。

1.3.2 沉积物 2003年4月25日,用彼得森采泥器在太湖梅梁湾口(125°25'50"N, 20°12'04"E)分别采集沉积物表层样品约100kg,沉积物在中国科学院南京地理与湖泊研究所太湖水体生态系统研究站(简称“太湖站”)进行现场处理后,装入清洁的聚乙烯保鲜袋中带回备用。

1.3.3 样品分析方法 样品采集后分成两组,在实验室中按《湖泊富营养化调查规范》^[11]直接进行处理。分别测定其TN、TP的值,TN采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法,TP采用钼-锑-抗分光光度法,用HACH-DR4000紫外分光光度计测定。

1.4 计算方法

1.4.1 底泥释放率的计算方法 底泥释放率的计算公式如下所示^[4]:

$$r = \left[\bar{V}(C_n - C_0) + \sum_{j=1}^n V_j(C_{j-1} - C_n) \right] / A \cdot t \quad (1)$$

式中, r 为释放率 ($\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$), \bar{V} 为环形水槽中水样体积(L); C_n 为第 n 次采样时水中营养物浓度 (mg/L); C_0 为初始营养物浓度 (mg/L); V_j 为每次采样量(L); C_{j-1} 为第 $j-1$ 次采样时水中营养物浓度 (mg/L); C_n 为添加原水后水体营养物浓度 (mg/L); t 为释放时间(d); A 为与水接触的沉积物表面积(m^2)。

1.4.2 太湖水量水质数值模拟方法 太湖的水量水质模型是在假设湖水为均匀不可压的流体,垂直方向上服从静水压力分布的基础上建立起来的。其具体的方程式、初始条件、边界条件以及收敛条件的确定见参考文献^[12,13];水质方程是以质量平衡方程为基础的,由于三维水质输移方程包涵很多不可确定的参数,在现有条件下,模型的验证存在困难,考虑到资料及模型计算工作量等因素,采用二维水质模型,其输移方程为^[14,15]:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + U \frac{\partial C_i}{\partial x} + V \frac{\partial C_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (E_x \frac{\partial C_i}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (E_y \frac{\partial C_i}{\partial y}) - K_i C_i + S_i$$

式中, C_i 为 TN, TP 的浓度; U, V 分别为 X, Y 方向上的流速分量; E_x, E_y 分别为 X, Y 向的扩散系数; K_i 分别为 TN, TP 的降解系数,分别取为 $0.1/\text{d}, 0.36/\text{d}, 0.01/\text{d}$; S_i 分别为 TN, TP 的底泥释放项,具体值则应用水槽试验所得到的结果。其定解条件和边界条件见文献^[14,15]。

2 结果与讨论

2.1 水槽试验结果与讨论

2.1.1 水槽试验过程与分析 根据泥沙起动理论,泥沙的起动一般可分为三种状态,即将动未动、少量动和普遍动^[16],不同起动状态对应的水体中的污染物质的浓度也有较大的变化,而且底泥释放的特点也有所不同,本实验中底泥的起动和释放也符合这一规律。

当水流较小时,泥液面保持静止。随着水流流速的加大,泥面开始发生变化。首先由于水流的加速,淤泥整体所受剪切力变大,泥面随水流发生错动;接着泥面上一层很薄的稀释层发生悬扬,此时淤泥处于“将动未动”阶段,流速达到 $25\text{cm}/\text{s}$ 左右。

随着流速的进一步增大,淤泥达到“少量动”阶段。此时由于水流紊动作用不断加强,床面局部地方不时有小块淤泥被冲起,淤泥呈散粒状在床面上滚,并摩擦床面而使其他地方的底泥开始悬浮,水体明显变得浑浊,这一过程对应的流速变化范围在 $25-50\text{cm}/\text{s}$ 之间。

当流速达到 $60-70\text{cm}/\text{s}$ 时,水流底层紊动更加剧烈,淤泥达到“普遍动”状态。这时可

清楚的看到旋涡不断掀起淤泥,平滑的床面受到较大破坏.特别是当某一局部被破坏后,这一部分的起动便急剧起来,淤泥被成层、成片掀起,水流很快便完全浑浊.

2.2.2 底泥中污染物质释放通量与水体流速的定量化关系研究 水体中 TN、TP 浓度随流速的变化关系如图 2、图 3 所示;底泥中 TN、TP 的释放率随流速的变化关系如图 4、图 5 所示.从图 2-图 5 TN、TP 浓度和释放率分别与流速的关系可以看出:当底泥处于“将动未动”状态时:随着流速的增大,底泥释放率呈上升趋势,TN、TP 浓度和释放率的增加幅度都不大,主要是由于底泥还只是受到了轻微的扰动,只有间隙水中的营养物质在大量释放,而底泥还未大量悬浮所致;随着流速的进一步增大,底泥达到“少量动”状态时,TN、TP 的浓度和释放率较前一阶段有了明显得上升,主要是由于此时已有部分底泥开始大量起动,小的泥沙颗粒悬浮到了上覆水体中,也带动了吸附在其上的营养物质,一并进入水体,同时下层的底泥间隙水也得以大量释放,致使水体 TN、TP 浓度升高;当流速达到 60-70cm/s 时,底泥处于“普遍动”状态时,TN、TP 的浓度和释放率产生了一个较大的突增,底泥中的营养物质被完全释放出来,TN、TP 的浓度分别为 11.27mg/L 和 0.7mg/L,分别是初始状态的 3 倍和 7 倍之多;TN、TP 的释放率也是原先状态的 10-20 倍.同样 Reddy 等^[17]在对 Apoka 湖的研究中也发现,悬浮作用(悬浮+扩散)造成的上覆水营养盐浓度增加可以达到单纯由扩散产生的营养盐浓度的数十倍.Sondergaard 等^[18]在对丹麦的 Arreso 湖(面积 41km²,平均水深 2.9m)的野外调查也发现,动力悬浮产生的营养盐浓度增加可以达到原先的 20-30 倍的数量级^[9],这充分说明了水动力作用在湖泊内源氮磷循环中扮演着非常重要的作用.

由整个实验结果,根据前文所述的底泥释放率的公式可以建立太湖底泥 TN、TP 释放通量与流速的关系式为:

$$y = 137.88e^{0.06x}, \quad (R^2 = 0.94)$$

$$y = 36.78e^{0.05x}, \quad (R^2 = 0.97)$$

其中 y 为底泥中 TN 或 TP 的释放率($\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$), x 为水体流速(cm/s).

通过建立的关系式可以看出:底泥中 TN、TP 释放率与流速的关系服从指数分布,在一

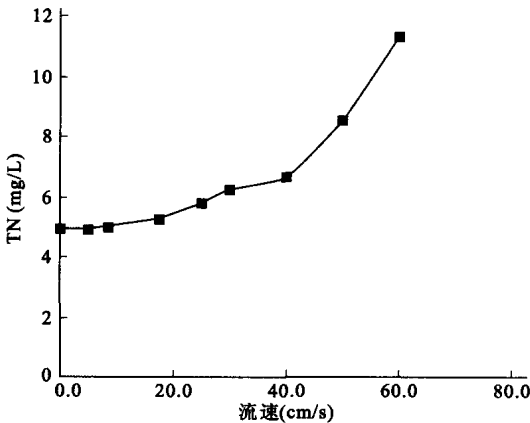


图 2 水体中 TN 浓度随流速的变化曲线
Fig. 2 The response relation curve between TN concentration and flow rate

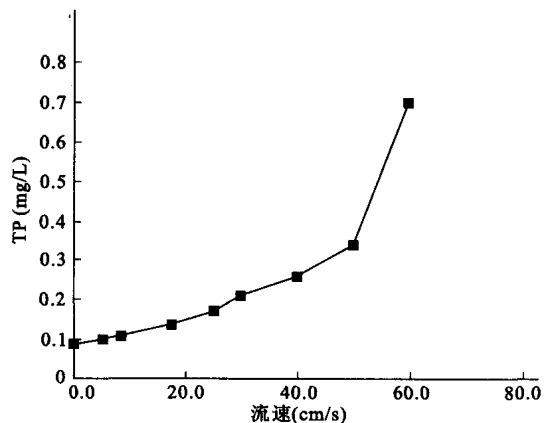


图 3 水体中 TP 浓度随流速的变化曲线
Fig. 3 The response relation curve between TN concentration and flow rate

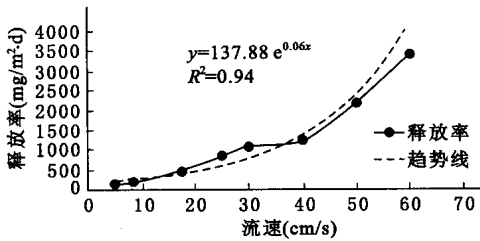


图 4 TN 释放率与流速的关系曲线

Fig. 4 The response relation curve between TN releasing rate and flow rate

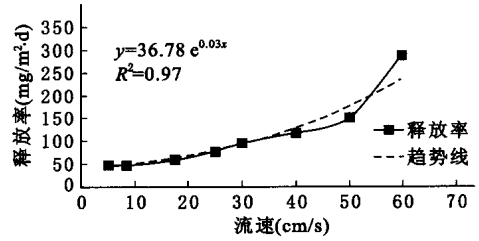


图 5 TP 释放率与流速的关系曲线

Fig. 5 The response relation curve between TP releasing rate and flow rate

定的流速范围内,底泥中 TN、TP 释放率随流速的增大而增大。总之,在浅水湖泊中,有机颗粒物在底泥的掩埋产生的还原环境中发生降解,析出进入孔隙水,动力悬浮使得表层的数厘米至数十厘米底泥发生悬浮,底泥孔隙水中营养盐发生释放,在风浪过程结束后,悬浮沉积物沉降至湖底,有机物继续降解等待下一次风浪的来临^[10]。故控制湖泊富营养化除了控制外源污染外,还特别要加大力度控制湖泊的内源释放。

2.2 水槽试验结果在太湖中的应用及结论

上文在水槽试验中建立了底泥 TN、TP 释放率与流速的变化关系表达式,下面就将这一结论应用于太湖的水量水质数学模型中,主要表现在对底泥释放项 S_i 的处理,即建立起底泥释放率与流速的关系,反映底泥释放率随空间和时间的动态变化,具体的表达式如下:

$$a_i = s_i / H; p = \sqrt{U^2 + V^2}$$

$$a_{TN} = 137.88e^{0.06P}; a_{TP} = 36.78e^{0.05P}$$

式中, P 为合速度, a_{TN} 和 a_{TP} 和分别为 TN、TP 的单位面积底泥释放系数。

本文采用 2001 年 9 月的水文水质资料作为模型的流量、流速边界条件和水质条件,风速取 9 月实测的平均值为 3.5m/s,风向为太湖夏季盛行的东南风;水动力模型、水质模型和富营养化模型的时间步长均取为 120s,计算的污染因子为 TN、TP 两项。并利用全太湖 13 个采样点每个月一次的水质监测资料和模型的计算结果进行比较,这 14 个采样点分别位于污染严重的梅梁湖区域、流速较大的太湖西岸区域以及湖心区域等,基本上遍布了整个太湖,具有一定的代表性。



图 6 太湖监测点位置分布图

Fig. 6 The location of monitoring point in Lake Taihu

采样点具体的分布位置见图 6, TN、TP 计算值与实测值的比较见表 1, 表 2: 太湖各监测点 2001 年 9 月 TN、TP 模型计算值与 2001 年 9 月实测值的相对误差大都在 10% - 30% 以内, 只有极少数点的相对误差超过了 30%, 计算值与实测值基本吻合, 说明本文所建立的 TN、TP 的底泥释放率与流速的变化关系是合理的, 可满足模型计算的要求。

表 1 TN 模型计算值与实测值的比较

Tab. 1 The comparisons of simulated value and observed value with TN

采样点	梅园	闾江口	三号标	拖山	小湾里	竺山湖	焦山	平台山
实测值(mg/L)	3.43	4	0.46	0.9	2.62	3.75	0.69	0.91
计算值(mg/L)	3.12	3.52	0.52	1.12	2.41	3.12	0.77	0.76
相对误差(%)	9.00	11.90	-13.00	-24.40	8.20	16.80	-11.60	17.00
采样点	乌龟山	新塘	夹浦	伏东	大浦	大钱	小梅口	
实测值(mg/L)	0.87	1.64	2.22	2.09	2.11	1.61	1.35	
计算值(mg/L)	0.83	1.8	1.48	1.47	1.87	1.59	1.54	
相对误差(%)	4.50	-9.80	33.30	29.70	11.40	1.20	-14.10	

表 2 TP 模型计算值与实测值的比较

Tab. 2 The comparisons of simulated value and observed value with TP

采样点	梅园	闾江口	三号标	拖山	小湾里	竺山湖	焦山	平台山
实测值(mg/L)	0.156	0.15	0.073	0.068	0.098	0.188	0.05	0.041
计算值(mg/L)	0.115	0.136	0.072	0.058	0.089	0.154	0.049	0.048
相对误差(%)	26.30	9.30	0.90	14.80	9.20	18.10	2.10	-16.40
采样点	乌龟山	新塘	夹浦	伏东	大浦	大钱	小梅口	
实测值(mg/L)	0.041	0.062	0.101	0.096	0.105	0.067	0.061	
计算值(mg/L)	0.05	0.057	0.072	0.071	0.082	0.08	0.073	
相对误差(%)	-22.00	7.50	28.70	26.00	21.90	-18.70	-20.20	

3 结论

本文通过实验在室内环形水槽内模拟了不同水动力条件下底泥的起动规律,分析了底泥运动的不同状态,通过考察上覆水中 TN、TP 浓度随流速的变化关系,计算出了水动力条件下太湖底泥中 TN、TP 释放通量与流速大小之间的关系,并将这一结果在太湖的水量水质数学模型中加以了应用,计算结果与实测结果比较接近,说明本文建立的底泥释放通量与水动力条件的关系是基本合理的,可满足模型计算的要求,同时也说明本文的实验装置在研究湖泊底泥的问题上是可行的,具有较强的可操作性。

参 考 文 献

- 1 秦伯强,范成新. 大型浅水湖泊内源营养盐释放的概念性模式探讨. 中国环境科学, 2002, 22(2): 150 - 153
- 2 尹大强,谭秋荣. 环境因子对五里湖沉积物磷释放的影响. 湖泊科学, 1994, 6(3): 240 - 244
- 3 金相灿,屠清瑛主编. 湖泊富营养化调查规范. 第二版. 北京:中国环境科学出版社. 1990
- 4 范成新. 太湖沉积物理化特性及磷释放模拟. 湖泊科学, 1995, 7(4): 341 - 350
- 5 范成新,杨龙元,张 路. 太湖底泥及其间隙水中氮磷垂直分布及其相互关系分析. 湖泊科学, 2000, 12(4): 359 - 366.
- 6 Istvanovics V. Seasonal variation of phosphorus release from the sediments of shallow lake Balaton (Hungary). *Water Research*, 1998, 22(12): 1473 - 1481
- 7 Moore P A Jr, Reddy K R. Role of Ph and Eh on phosphorus geochemistry in sediment of Lake Okeechobee, Florida. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23: 955 - 964

- 8 张 路, 范成新, 秦伯强等. 模拟扰动条件下太湖表层沉积物磷行为的研究. *湖泊科学*, 2001, **13**(1): 35 - 42
- 9 Ccanfield D E Jr, Hoyer M V. The eutrophication of Lake Okeechobee. *Lake and Reservoir Management*, 1988, **4**: 91 - 99
- 10 秦伯强, 胡维平, 高 光等. 太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式. *科学通报*, 2003, **48**(17): 1822 - 1831
- 11 金相灿, 屠清瑛主编. 湖泊富营养化调查规范. 第二版. 北京: 中国环境科学出版社. 1990
- 12 逢 勇, 濮培民等. 太湖风生流三维数值模拟试验. *地理学报*, 1996, **51**(4): 328 - 332
- 13 吴旭光. 分裂特征线法及收敛稳定性分析. *河海大学学报*, 1992, **20**(6): 71 - 79
- 14 逢 勇, 姚 琪等. 太湖地区大气-水环境的综合数值研究. 北京: 气象出版社, 1998: 48 - 70
- 15 朱维斌等. 河流混合带污染物质二维浓度分布的计算. *河海大学学报*, 1989, **17**(4): 108 - 113
- 16 窦国仁. 再论泥沙起动流速. *泥沙研究*, 1999, (6): 1 - 9
- 17 Reddy K R, Fisher M M & Ivaoff D. Resuspension and diffusive flux of nitrogen and phosphorus in a hypereutrophic lake. *Journal of Environmental Quality*, 1996, **25**: 363 - 371
- 18 Sondergaard M, Kristensen P & Jeppesen E. Phosphorus release from resuspended sediment in the shallow and wind - exposed Lake Arreso, Denmark. *Hydrobiologia*, 1992, **228**: 91 - 99

On the Relation Between the Release Rate of TN, TP from Sediment and Water Velocity

LI Yiping¹, PANG Yong¹, LU Jun², ZHANG Gang¹, DING Ling¹,
PENG Jinping¹, WANG Chao¹ & FAN Lili

(1: College of Environment Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China;

2: Hydrology and Water Resources Bureaus of Guangxi province, Nanning 530023, P. R. China)

Abstract

The starting principles of bottom mud in Lake Taihu were simulated in the laboratory in an annular tank; and the different stages of bottom mud movement were analyzed in this paper. The velocity of flow was basically uniformity in this annular tank, the rotation rate of tank and velocity of flow can be converted accurately, the law of sediment suspension and releasing were simulated by different disturbance forces. The sediments from Lake Taihu were used in this experiment, the relational expression between the release rate of TN, TP and water velocity was calculated on the basis of the relationship between the concentration of TN, TP and water velocity. The calculated result was applied in the mathematical model of water flow and water quality in Lake Taihu, and a satisfactory result was obtained.

Keywords: Release from sediment; hydrodynamic; annular tank; mathematical model; Lake Taihu